

ВЛИЯНИЕ БОКОВЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИЛ НА РАБОТУ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СЕПАРАТОРОВ С ЛИНЕЙНЫМИ ИНДУКТОРАМИ

Электродинамическая сепарация металлосодержащих отходов и лома цветных металлов является одной из перспективных технологий, дающих значительный эколого-экономический эффект [1 – 3]. Примерами таких технологий являются сепарация дробленого электронного лома с целью получения селективных концентратов цветных металлов, а также сортировка лома цветных металлов по видам сплавов при подготовке к металлургическому переделу. Исследование и разработка электродинамических сепараторов с бегущим магнитным полем для решения указанных задач ведутся в лаборатории кафедры «Электротехника и электротехнологические системы» УрФУ.

Установки электродинамической сепарации различаются как по способу возбуждения бегущего магнитного поля, так и по способам подачи и отвода сепарируемого материала. Для обработки мелкой фракции дробленого лома в диапазоне крупности 10-50 мм целесообразны электродинамические сепараторы на основе двухстороннего линейного индуктора с подачей материала по наклонной плоскости. Такой сепаратор схематично показан на рис. 1. Сепаратор предполагает верхнюю подачу исходного материала и сбор полученных фракций в приемники продуктов разделения, расположенные внизу наклонной плоскости. Бегущее магнитное поле, создаваемое двухсторонним линейным индуктором, питаемым трехфазным переменным током частотой 50 Гц, наводит в проводящих немагнитных металлических частицах вихревые токи и обеспечивает создание электромагнитного усилия извлечения, направленного в сторону движения поля. Сепарируемые частицы цветных металлов отклоняются от линии подачи и приобретают траектории, зависящие от соотношения электропроводности металла и его удельного веса (γ/ρ). Металлы и сплавы, отличающиеся по указанному показателю, собираются на выходе установки в разные приемники продуктов сепарации.

Формирование траекторий движения металлических частиц при сепарации зависит как от электромагнитных сил, так и от конкурирующих с ними механических сил (гравитации, трения, динамического сопротивления среды и др.). Поэтому при расчетах и проектировании электродинамический сепаратор необходимо рассматривать как сложную электромеханическую систему и оценивать влияние на конечный результат максимального количества параметров линейного индуктора и механической части установки. Упрощенные математическая модель и методика расчета траекторий движения извлекаемых металлических частиц в сепараторах, подобных показанному на рис. 1, предложены в [3]. При этом предполагается разбиение плоскости подачи на три зоны. В первой зоне (верхняя часть плоскости до индуктора) движение частиц определяется только действием скатывающей силы и силы трения, зависящих от силы тяжести частицы, угла наклона плоскости и коэффициента трения металла о плоскость. На этом участке плоскости частицы движутся прямолинейно и равноускоренно. Во второй зоне (под индуктором) к указанным силам добавляется электромагнитная сила, смещающая частицы в направлении движения бегущего магнитного поля. На выходе из индуктора частица имеет отклонение от линии подачи B_2 . В третьей зоне (от индуктора до приемников продуктов разделения) частица движется по инерции и дополнительно откло-

няется на расстояние B_3 . Предложенная методика позволяет рассчитывать траектории движения сепарируемых частиц с учетом электромагнитной силы извлечения $F_{эм}$, зависящей от параметров индуктора и свойств металлических частиц, и с учетом параметров механической части установки (размеры наклонной плоскости (L_0 – до индуктора, $L_и$ – под индуктором и $L_п$ – после индуктора), угол ее наклона α , начальная скорость частиц V_0 , коэффициент трения $k_{тр}$).

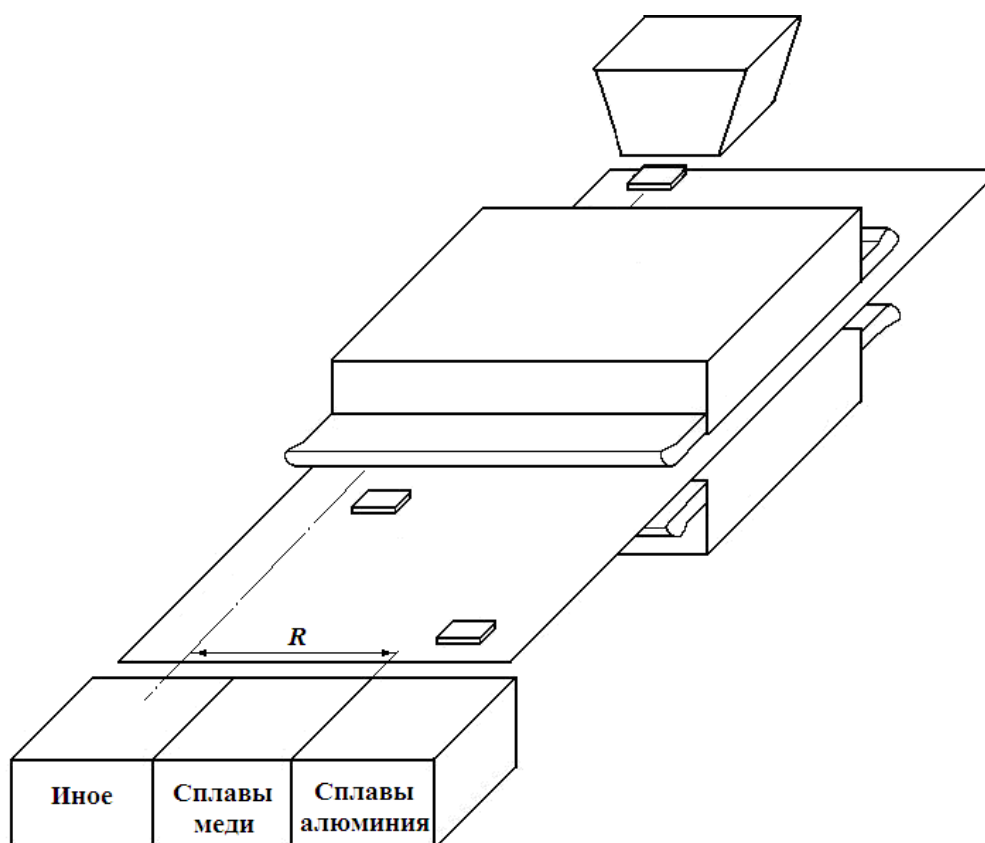


Рис. 1. Схема электродинамического сепаратора на основе двухстороннего линейного индуктора

Сопоставления результатов расчетов, выполненных по указанной методике, с данными экспериментов подтверждают возможность получения достоверных данных о траекториях движения частиц. Например, на рис. 2 показаны расчетные (линии) и экспериментальные (точки) траектории движения извлекаемых частиц на выходе из индуктора (в зоне 3) для лабораторного сепаратора с двухсторонним линейным индуктором (полюсное деление $\tau = 75$ мм, зазор $\delta = 12$ мм). Данные приведены для алюминиевых пластин разной формы и размеров: квадратных (1 – сторона квадрата 10 мм, 2 – 15 мм, 3 – 20 мм при толщине 0,2 мм) и круглых (1 – диаметр 25 мм, 2 – 45 мм при толщине 2 мм).

В то же время исследования показали, что погрешности расчетов по указанной методике, учитывающей только основную электромагнитную силу, действующую на частицы в активной зоне индуктора, могут существенно возрастать. В частности, погрешности расчетов увеличиваются при снижении начальной скорости подачи частиц V_0 и уменьшении расстояния от точки подачи до индуктора L_0 . Анализ таких ситуаций показал необходимость дополнительного учета при расчетах боковых

электромагнитных сил, возникающих при входе проводящих частиц в магнитное поле индуктора и выходе их из поля.

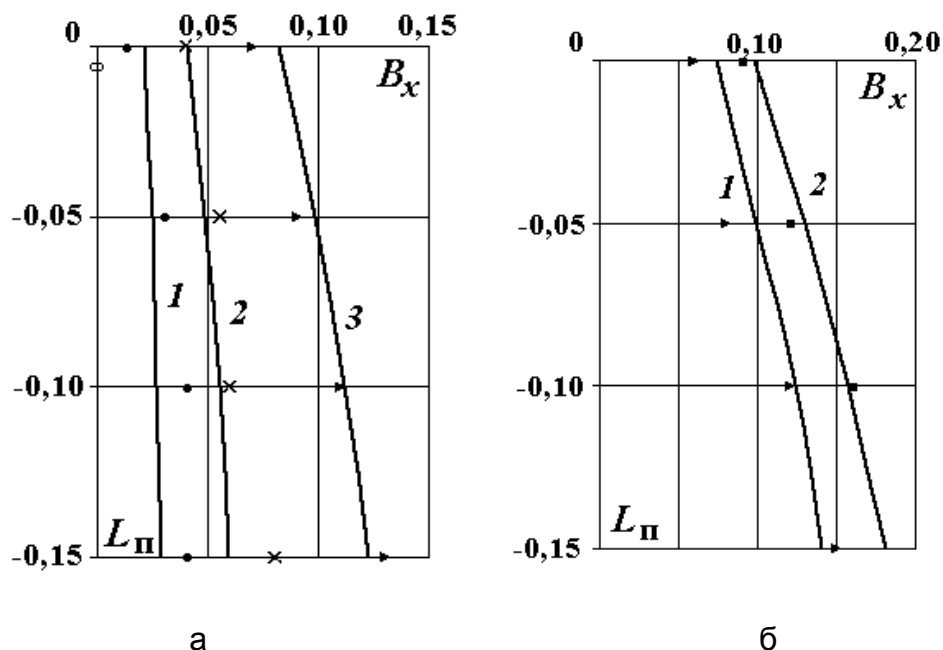


Рис. 2. Траектории движения алюминиевых частиц по наклонной плоскости:
а – квадратные пластины, б – круглые

Корректный расчет указанных боковых усилий $F_{\text{бвх}}$ и $F_{\text{бвых}}$ может быть произведен только при расчете переходного электромеханического процесса входа (либо выхода) проводящей частицы в неравномерное магнитное поле на краю индуктора в трехмерной постановке. В первом приближении такие усилия могут быть рассчитаны при использовании закона распределения магнитной индукции на краю индуктора, предложенного в [4 – 5]:

$$B(y) = B_0 \cdot e^{-y/c\delta} \cdot \sin \omega t, \quad (1)$$

где $B_0 = 0,83B_m$ [4] – значение амплитуды магнитной индукции при $y = 0$;
 B_m – амплитуда индукции в центральной части активной зоны;
 c – коэффициент, учитывающий влияние на распределение магнитного поля в краевой зоне реальных размеров индуктора (воздушного зазора δ и высоты сердечника h) [5].

С учетом (1) авторами получено выражение для бокового электромагнитного усилия, действующего на проводящую пластину на выходе из активной зоны индуктора:

$$F_6 = B_0^2 \cdot \frac{\gamma \cdot d \cdot c^2 \delta^2 \cdot b}{4\sqrt{2}} \cdot \cos \varphi_2 \cdot e^{-2y/c\delta} \cdot \left[1 - e^{-2a/c\delta} - \frac{2c\delta}{a} \cdot (e^{-a/c\delta} - 1)^2 \right] \times \left(\omega \cdot \sin \varphi_2 - \frac{V}{c\delta} \cdot \cos \varphi_2 \right), \quad (2)$$

где b – длина проводящей пластины по продольной оси индуктора;
 a и d – ширина и толщина пластины;
 V – скорость ее движения;
 $\Omega = 2\pi f$ – угловая частота поля.

Входящая в (2) координата y определяет положение левого края проводящей пластины относительно края индуктора. Боковое электромагнитное усилие по (2) удобно представить в виде двух слагаемых

$$F_6 = F_{6\omega} - F_{6V}, \quad (3)$$

где $F_{6\omega}$ – составляющая бокового усилия, определяемая вторичными токами, создаваемыми ЭДС трансформации (получается при подстановке в (2) значения $V=0$);

F_{6V} – составляющая бокового усилия, определяемая вторичными токами, создаваемыми ЭДС движения (получается подстановкой в (2) $\omega=0$).

Как следует из (2), на выходе из активной зоны составляющая усилия $F_{6\omega}$ выталкивает проводящую пластину из активной зоны индуктора (в направлении затухания поля), а составляющая F_{6V} препятствует выходу пластины из поля. На входе в индуктор обе составляющие бокового электромагнитного усилия будут препятствовать входу проводящей пластины в активную зону индуктора.

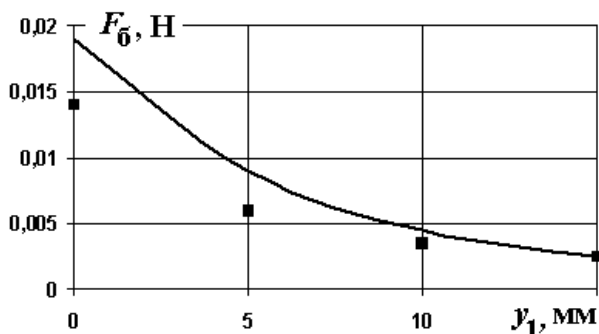


Рис. 3. Сопоставление расчетных и экспериментальных усилий

Экспериментальная оценка суммарного бокового усилия затруднительна. Поэтому была выполнена оценка усилий на краю описанной ранее ЛИМ при $V = 0$. На рис. 3 показано сравнение расчетных (линии) и экспериментальных (точки) зависимостей бокового усилия для алюминиевой пластины размерами $40 \times 40 \times 3$ мм от удаления ее от края индуктора ($y_1 = y - a/2$ – положение центра пластины). Можно отметить хорошее качественное совпадение кривых и малые погрешности расчета при $y_1 > 10$ мм. При $y_1 < 10$ мм край пластины находится под индуктором, где индукция магнитного поля имеет меньшие значения, чем получаемая по (1).

Исследования показывают, что боковые электромагнитные усилия соизмеримы со скатывающими усилиями, поэтому их следует учитывать при оценке динамики движения проводящих частиц в электродинамических сепараторах.

Список использованных источников

1. Технология отходов / Л. Я. Шубов, М. Е. Ставровский, А. В. Олейник. М.: Альфа-М; Инфра-М, 2011. 352 с.
2. Wilson R. J., Veasey T. J., Squires D. M. Application of mineral processing techniques for the recovery of metal from post-consumer wastes / Minerals Engineering. 1994, № 7, pp. 975 – 984.
3. Электродинамические сепараторы с бегущим магнитным полем: основы теории и расчета / А.Ю. Коняев, И.А. Коняев, Н.Е. Маркин, С.Л. Назаров. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. - 104 с.
4. Вольдек А. И. Индукционные МГД-машины с жидкометаллическим рабочим телом. Л.: Энергия, 1970. – 272 с.
5. Коняев А. Ю., Резин М. Г. Расчет магнитных сопротивлений шунтирования машин с разомкнутым магнитопроводом // Электрические машины и электромашинные системы: межвуз. сб. научн. трудов. Пермь: изд. ППИ, 197. С. 92 – 97.